

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.

Attorney Docket No. 5649-909

PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re: Chung et al.

Serial No.: To Be Assigned

Filed: Concurrently Herewith

For: METHODS, APPARATUS AND COMPUTER PROGRAM PRODUCTS FOR
SIMULATING PLASMA BEHAVIOR IN A PLASMA REACTOR APPARATUS
USING TWO-DIMENSIONAL CROSS-SECTION COMPUTATIONS



November 27, 2001

BOX PATENT APPLICATION
U.S. Patent and Trademark Office
P.O. Box 2327
Arlington, VA 22202

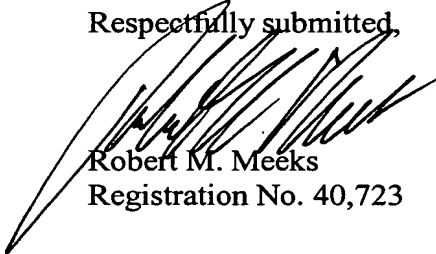
SUBMITTAL OF PRIORITY DOCUMENT

Sir:

To complete the requirements of 35 USC 119, enclosed is a certified copy of the
following Korean priority application:

2001-167, filed January 3, 2001.

Respectfully submitted,


Robert M. Meeks
Registration No. 40,723



20792

PATENT TRADEMARK OFFICE

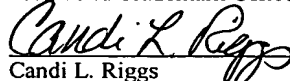
Telephone: 919/854-1400
Facsimile: 919/854-1401
Our File No. 5649-909

CERTIFICATE OF EXPRESS MAILING

"Express Mail" mailing label number EL 920739753 US

Date of Deposit: November 27, 2001

I hereby certify that this paper or fee is being deposited with the United States Postal Service "Express Mail Post Office to Addressee" service under 37 CFR 1.10 on the date indicated above and is addressed to BOX PATENT APPLICATION, U.S. Patent and Trademark Office, P.O. Box 2327, Arlington, VA 22202.


Candi L. Riggs

Date of Signature: November 27, 2001

대한민국 특허청
KOREAN INTELLECTUAL
PROPERTY OFFICE

J1040 U.S. PTO
09/995421



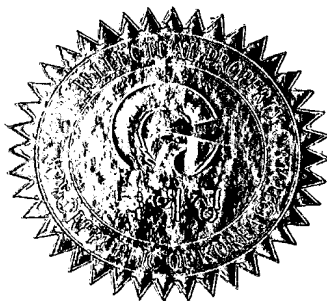
별첨 사본은 아래 출원의 원본과 동일함을 증명함.

This is to certify that the following application annexed hereto
is a true copy from the records of the Korean Intellectual
Property Office.

출원 번호 : 특허출원 2001년 제 167 호
Application Number

출원 년 월 일 : 2001년 01월 03일
Date of Application

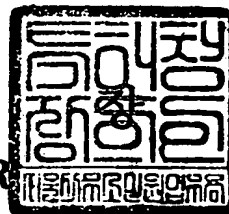
출원인 : 삼성전자 주식회사
Applicant(s)



2001 년 03 월 28 일

특 허 청

COMMISSIONER



【서류명】	특허출원서
【권리구분】	특허
【수신처】	특허청장
【참조번호】	0013
【제출일자】	2001.01.03
【국제특허분류】	H01L
【발명의 명칭】	플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법
【발명의 영문명칭】	Method for simulation of plasma processing by a plasma apparatus
【출원인】	
【명칭】	삼성전자 주식회사
【출원인코드】	1-1998-104271-3
【대리인】	
【성명】	이영필
【대리인코드】	9-1998-000334-6
【포괄위임등록번호】	1999-009556-9
【대리인】	
【성명】	정상빈
【대리인코드】	9-1998-000541-1
【포괄위임등록번호】	1999-009617-5
【대리인】	
【성명】	이래호
【대리인코드】	9-1999-000226-8
【포괄위임등록번호】	2000-002818-3
【발명자】	
【성명의 국문표기】	정원영
【성명의 영문표기】	CHUNG, Won Young
【주민등록번호】	691003-1920521
【우편번호】	449-900
【주소】	경기도 용인시 기흥읍 공세리 호수 청구아파트 107동 180호
【국적】	KR

【발명자】

【성명의 국문표기】 김태경
【성명의 영문표기】 KIM,Tai Kyung
【주민등록번호】 660612-2056419
【우편번호】 437-040
【주소】 경기도 의왕시 삼동 부곡동 130-1 효성 청솔아파트 104동 1703호
【국적】 KR

【발명자】

【성명의 국문표기】 오재준
【성명의 영문표기】 OH,Jae Joon
【주민등록번호】 650426-1074328
【우편번호】 463-070
【주소】 경기도 성남시 분당구 야탑동 526번지 탑마을 경남아파트 706동 1403 호
【국적】 KR

【신규성주장】

【공개형태】 간행물 발표
【공개일자】 2000.09.06

【심사청구】

청구

【취지】

특허법 제42조의 규정에 의한 출원, 특허법 제60조의 규정에 의한 출원심사를 청구합니다. 대리인
 이영필 (인) 대리인
 정상빈 (인) 대리인
 이래호 (인)

【수수료】

【기본출원료】	20 면	29,000 원
【가산출원료】	13 면	13,000 원
【우선권주장료】	0 건	0 원
【심사청구료】	8 항	365,000 원
【합계】		407,000 원

【첨부서류】

1. 요약서·명세서(도면)_1통 2. 신규성(출원시의 특례)규정을 적용받기 위한 증명서류_1통[추후제 출]

【요약서】**【요약】**

본 발명은 플라즈마 반응기와, 상기 플라즈마 반응기 주위를 일정 속도로 회전하고 있는 비대칭구조로 배열된 복수개의 영구자석이 구비되어 있는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법을 개시한다. 본 발명은 먼저, (a) 플라즈마 반응기 형태 및 공정 조건을 입력하고, 플라즈마 충돌 반응 데이터를 입력한다. 이어서, (b) 상기 영구자석에 의한 정자기장을 3차원적으로 해석한다. 다음에, (c) 상기 데이터들을 이용하여 몬테카를로법에 의하여 전자 밀도 및 온도를 계산하고, 이온 및 중성종의 전달 현상을 해석하여 수렴할 때까지 반복하여 계산한다. 이어서, (d) 상기 수렴된 값을 이용하여 전체적인 플라즈마 특성을 얻는다. 본 발명에 의하면, 시뮬레이션에 소요되는 계산 시간을 대폭으로 줄일 수 있고, 또한 플라즈마 특성에 대한 비교적 정확한 해석이 가능하다.

【대표도】

도 4a

【명세서】**【발명의 명칭】**

플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법{Method for simulation of plasma processing by a plasma apparatus}

【도면의 간단한 설명】

도 1은 ICP(inductively coupled plasma) 장비에 대한 종래의 시뮬레이션 방법의 흐름도이다.

도 2 및 도 3은 DRM(Dipole Ring Magnet) 플라즈마 장치를 도시한 도면들이다.

도 4a 및 도 4b는 본 발명의 바람직한 실시예에 따라 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정을 시뮬레이션하는 방법을 나타낸 흐름도이다.

도 5는 영구자석에 의해 형성된 웨이퍼 위에서의 정자기장 분포를 도시한 도면이다.

도 6은 3개면과 8개면의 단면 자기장 분포에 대한 2차원 플라즈마 시뮬레이션을 이용하여 얻은 실리콘 산화막의 식각 속도 분포를 도시한 그래프이다.

도 7은 파워 변화에 대하여 실제로 측정한 플라즈마 밀도와, 3개면에 대하여 2차원 플라즈마 시뮬레이션을 수행하여 얻은 플라즈마 밀도를 도시한 그래프이다.

도 8a는 식각가스 조성비 변화에 따른 실리콘 산화막의 식각 속도 분포를 도시한 그래프이다.

도 8b는 식각가스 조성비 변화에 따른 실리콘 질화막의 식각 속도 분포를 도시한 그래프이다.

【발명의 상세한 설명】**【발명의 목적】****【발명이 속하는 기술분야 및 그 분야의 종래기술】**

- <9> 본 발명은 반도체 소자의 제조에 널리 사용되는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정을 시뮬레이션하는 방법에 관한 것이다.
- <10> 1996년 세계 반도체 통계(WSTS)에 따르면 반도체 제조 장비의 판매 중 플라즈마 관련 장비가 차지하는 비중이 40%에 이르는 것으로 나타났다. 최근 플라즈마 공정은 식각 공정뿐만 아니라 증착, 이온 주입, 세정 등 공정 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있으며, 차세대 반도체 소자의 제조에 있어서는 그 비중이 더욱더 증가할 전망이다.
- <11> 한편, 반도체 소자의 고집적화와 패턴의 미세화에 따른 식각 공정 기술은 균일도, 선택비 및 비등방성 등의 요구 조건을 맞추기 위해 플라즈마 장비에 대한 더 정밀한 제어가 요구되고 있다. 따라서 공정 셋-업(set-up)에 많은 비용과 시간이 요구된다. 이는 플라즈마 공정 시뮬레이션을 통해 원가 절감 및 시간 단축을 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 표면 반응 및 플라즈마 공정의 현상 이해가 요구되고 있으며, 이에 따라 플라즈마 모델링과 시뮬레이션의 필요성이 점점 더 증가하고 있다.
- <12> 도 1은 ICP(inductively coupled plasma) 장비에 대한 종래의 시뮬레이션 방법의 흐름도이다.
- <13> 도 1을 참조하면, 먼저, 플라즈마 반응기 형태와 공정 조건이 주어지고, 플라즈마 충돌 반응에 대한 데이터가 필요하다.
- <14> 플라즈마 시뮬레이션은 전자기장(electro magnetic field) 해석, 몬테카를로(Monte

Carlo)법에 의한 전자 밀도 및 온도 계산, 화학종에 대한 전달 현상 해석의 세 가지 모듈로 구성되어 있으며, 이 모듈들이 순차적으로 계산되어 수렴될 때까지 반복된다. 이 시뮬레이션을 통하여 플라즈마 반응기 내에서의 전자기장 분포, 전자의 밀도 및 온도, 표면 반응에 직접 참여하는 이온과 중성종의 분포, 웨이퍼 표면으로 입사하는 플럭스(flux) 등의 식각 공정에 영향을 미치는 플라즈마 특성을 얻는다. 그러나, 이러한 시뮬레이션 방법을 이용하여 3차원 계산을 수행할 경우 수일 이상의 계산 시간이 요구되므로 이를 응용하여 실제 공정 개발 등에 적용하기란 어려움이 있다.

- <15> DRM(dipole ring magnet) 플라즈마 장치는 반도체 공정 중 식각 공정에 많이 사용되는 장비이다. 상기 DRM 플라즈마 장치는 MERIE(magnetically enhanced reactive ion etching) 방식으로 각기 다른 자력과 선속을 가진 20여개의 영구자석이 플라즈마 반응기 주위를 약 20rpm의 속도로 회전하는 구조로 되어 있다('A New High-Density Plasma Etching System Using A Dipole-Ring Magnet', JJAP, pp.6274-6278, 1995 참조). 이러한 복잡한 자석 구조로 인해 DRM 플라즈마 장치에 대한 시뮬레이션 연구가 거의 진행되지 않았다. 즉, DRM 플라즈마 장비와 같이 3차원 비정상상태의 플라즈마를 해석하기 위한 방법이 개발되어 있지 않다. 물론 종래의 방식('A three-dimensional model for inductively coupled plasma etching reactors:Azimuthal symmetry, coil properties, and comparison to experiments', JAP, pp.1337-1344, 1996 참조)을 이용하여 외부 자기장을 가진 플라즈마를 시뮬레이션 할 수는 있으나, 종래의 3차원 시뮬레이션 방법을 사용한다고 하더라도 수일 이상의 계산 시간이 요구됨에 따라 실제 이를 응용하여 공정 개발 등에 적용하기란 커다란 어려움이 있다.

【발명이 이루고자 하는 기술적 과제】

- <16> 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 플라즈마 반응기와, 상기 플라즈마 반응기 주위를 일정 속도로 회전하고 있는 비대칭구조로 배열된 복수개의 영구자석이 구비되어 있는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정을 시뮬레이션 함에 있어서, 시뮬레이션에 소요되는 계산 시간을 대폭 줄일 수 있고, 플라즈마 특성에 대한 비교적 정확한 해석이 가능한 시뮬레이션 방법을 제공함에 있다.

【발명의 구성 및 작용】

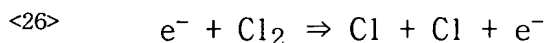
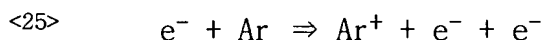
- <17> 상기 기술적 과제를 달성하기 위하여 본 발명은 플라즈마 반응기와, 상기 플라즈마 반응기 주위를 일정 속도로 회전하고 있는 비대칭구조로 배열된 복수개의 영구자석이 구비되어 있는 플라즈마 장치에 플라즈마 처리 공정을 시뮬레이션하는 방법에 관한 것으로, 먼저, (a) 상기 플라즈마 반응기 형태 및 공정 조건을 입력하고, 플라즈마 충돌 반응 데이터를 입력한다. 이어서, (b) 상기 영구자석에 의한 정자기장(static magnetic field)을 3차원적으로 해석한다. 다음에, (c) 상기 데이터들을 이용하여 몬테카를로법에 의하여 전자 밀도 및 온도를 계산하고, 이온 및 중성종의 전달 현상을 해석하여 수렴할 때까지 반복하여 계산한다. 이어서, (d) 상기 수렴된 값을 이용하여 전체적인 플라즈마 특성을 얻는다.
- <18> 상기 (c) 단계의 플라즈마 해석은 특징적인 자기장 방향에서의 단면 자기장 분포에 대한 2차원 플라즈마 시뮬레이션을 수행하여 이루어진다. 상기 2차원 플라즈마 시뮬레이션은 축을 포함한 복수개의 2차원 단면에 대하여 계산하고, 각 단면에 대한 수렴값을 얻고, 이를 평균하여 플라즈마 특성을 얻는다.

- <19> 상기의 기술적 과제를 해결하기 위하여 본 발명에 따른 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체는, 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 상기 시뮬레이션 방법의 각 단계를 프로그램화한 프로그램 모듈들을 구비한다.
- <20> 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 상세하게 설명하기로 한다. 그러나, 이하의 실시예는 이 기술분야의 통상적인 지식을 가진 자에게 본 발명이 충분히 이해되도록 제공되는 것으로서 본 발명의 범위를 한정하는 것으로 해석되어져서는 아니된다. 도면상에서 동일 부호는 동일한 요소를 지칭한다.
- <21> 도 2 및 도 3은 DRM 플라즈마 장치를 도시한 도면들이다. 도 2는 DRM 플라즈마 장치의 영구자석의 배치를 보여주는 평면도이고, 도 3은 DRM 플라즈마 장치의 단면도이다.
- <22> 도 2 및 도 3을 참조하면, DRM 플라즈마 장치는 MERIE(magnetically enhanced reactive ion etching) 방식으로 각기 다른 자력과 자속을 가진 20여개의 영구자석(102)들이 플라즈마 반응기(100) 주위를 둘러싸고 있는 구조로 되어 있다. 영구자석(102)들은 비대칭적으로 배열되어 있으며, 회전축(106)을 중심으로 약 20rpm의 속도로 플라즈마 반응기(100) 주위를 회전한다. 도 2에 도시된 바와 같이, 각 영구자석(102)의 자화방향(magnetized direction)(103)은 각각 다른 방향으로 향하고 있다. 도 2에서 참조부호 101은 플라즈마 반응기(100) 내부에 형성되는 자기장을 벡터로 나타낸 것으로, 자기장의 크기와 방향을 나타낸 것이다. 영구자석(102)의 배치는 사용하는 플라즈마 장치에 따라 조금씩 다를 수 있다. 도 2에는 영구자석(102)의 배치가 규칙적으로 배열된 형태로 이루어져 있으나, 도 5에 도시된 바와 같이 영구자석(102)이 불규칙적으로 배치될 수도 있다. 이러한 영구자석(102)들에 의해 DRM 플라즈마 장치내에 자기장이 형성된다. 이 자

기장은 정자기장(static magnetic field)으로서, 플라즈마 반응기(100) 내부의 플라즈마 상태에 거의 영향받지 않는다. 플라즈마 반응기(100) 내부의 플라즈마(104)가 안정화되는데 소요되는 시간은 수백 마이크로초(μs) 이하이다. 플라즈마 반응기(100) 내부에 도입되는 웨이퍼(W)는 척(C)에 의해 지지된다. 전극(108)에는 고주파 전원(110)이 연결되어 있다.

<23> 도 4a 및 도 4b는 플라즈마 반응기와, 상기 플라즈마 반응기 주위를 일정 속도로 회전하고 있는 비대칭구조로 배열된 복수개의 영구자석이 구비되어 있는 플라즈마 장치를 시뮬레이션하는 방법을 나타낸 흐름도이다. 시뮬레이션 단계는 다음과 같다.

<24> 도 4a 및 도 4b를 참조하면, 먼저, 플라즈마 반응기(100) 형태 및 공정 조건을 입력한다. 즉, 플라즈마 반응기(100)의 크기, 자석의 위치 등의 플라즈마 반응기(100)의 형태를 시뮬레이션 프로그램에 입력하고, 파워, 압력, 기체 조성비 등의 공정 조건을 입력한다. 플라즈마 충돌 반응 데이터도 시뮬레이션 프로그램에 입력한다. 플라즈마 충돌 반응 데이터라 함은 다음과 같은 충돌 반응에 대한 반응 속도 상수 등을 말하며, 전자 온도 등의 함수로 나타내어 진다.



<27> 이어서, 영구자석(102)에 의해 유도된 자기장을 상용 소프트웨어를 이용하여 3차원적으로 해석한다. 상기 상용 소프트웨어로는 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하는 벡터필드(VectorFields)라는 상용 툴(tool)을 사용하는 것이 바람직하다.

영구자석(102)에 의해 유도된 자기장은 정자기장으로, 플라즈마 반응기(100) 내부의

플라즈마(104) 상태에 영향을 거의 받지 않기 때문에 플라즈마(104)와 독립적으로 계산이 가능하다.

<28> 이어서, 몬테카를로(Monte Carlo)법에 의한 전자 밀도 및 온도의 계산과, 이온 및 중성종의 전달 현상 해석을 수렴할 때까지 반복하여 수행한다. 도 4a에서는 먼저 몬테카를로법에 의한 전자 밀도 및 온도를 계산한 후, 이온 및 중성종의 전달 현상 해석을 수행하나, 도 4b에서 처럼 이온 및 중성종의 전달 현상 해석을 먼저 수행한 후, 몬테카를로법에 의하여 전자 밀도 및 온도를 계산할 수도 있음은 물론이다. 이러한 플라즈마의 해석은 특징적인 자기장 방향에서의 단면 자기장 분포에 대한 2차원 플라즈마 시뮬레이션을 수행하여 실시한다. 구체적으로는, 특징적인 자기장 방향에서의 축(106)을 포함한 복수개의 2차원 단면에 대한 플라즈마 해석을 수행하여, 각 단면에 대한 수렴값을 얻는다. 플라즈마 반응기(100) 주위를 둘러싸고 있는 영구자석(102)들은 대칭 구조가 아니고, 또한 회전을 하고 있기 때문에 플라즈마(104) 상태를 3차원 비정상상태 문제로 해석을 하여야 하나, 이 경우 수일 이상의 계산 시간이 필요하게 된다. 이 때문에 자기장의 해석은 플라즈마 반응기(100) 내부의 플라즈마(104) 상태에 영향을 거의 받지 않기 때문에 플라즈마(104)와 독립적으로 3차원적으로 수행하고, 플라즈마의 해석은 특징적인 자기장 방향에서의 축(106)을 포함한 단면 자기장 분포에 대한 2차원 플라즈마 시뮬레이션을 수행한다. 이는 주어진 축대칭 2차원 정자기장 분포에 대해 플라즈마(104)가 안정화되는 시간은 수백 마이크로초(μs) 정도 이하이므로, 영구자석(102)이 플라즈마 반응기(102) 주위를 약 20 rpm 정도로 회전하기 때문에 발생하는 자기장 분포의 시간에 따른 변화는 마치 자기장 단면 분포의 스냅사진(snapshot)과 같이 볼 수 있기 때문이다. 따라서 상기와 같은 특징적인 자기장 방향에서의 축(106)을 포함한 단면 자기장 분포에

대한 2차원 플라즈마 해석이 가능하다. 이 때의 시뮬레이션 수행 시간은 플라즈마(104) 기체와 조건에 따라 다르지만, 아르곤(Ar) 플라즈마의 경우 1시간 정도 이내의 시간이 소요된다.

<29> 이하에서는 몬테카를로법에 의한 전자의 밀도 및 온도의 계산과, 이온 및 중성종의 전달 현상을 해석하는 방법의 예를 설명하기로 한다.

<30> 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 모든 가능한 전자-이온, 전자-중성분자/원자 충돌 확률을 계산하여 확률 배열(probability array)로써 보관한다. 이는 다음과 같은 충돌 횟수(collision frequency)로부터 구하게 된다.

<31> 【수학식 1】

$$v_{ij} = \left(\frac{2\varepsilon_i}{m_e} \right)^{1/2} \sigma_{ij} N_j$$

<32> 여기서, σ_{ij} 는 j-프로세스, i-에너지에서의 전자 충돌 단면적(electron impact cross-section)을 나타내고, N_j 는 j-프로세스에 대한 충돌 파트너의 밀도를 나타내며, ε_i 는 에너지를, m_e 는 전자 질량을 나타낸다. 결과적으로 확률 배열 P_{ij} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

<33> 【수학식 2】

$$P_{ij} = \left[\sum_{l=1}^I v_{il} + (v_m - v_i) \right] / v_m$$

<34> 여기서, v_i 와 v_m 은 각각 다음과 같이 나타낸다.

<35> 【수학식 3】

$$v_i = \sum_{l=1}^{I_{\max}} v_{il}$$

<36> 【수학식 4】

$$v_m = \max(v_i)$$

<37> 여기서, l_{max} 는 프로세스의 총수를 나타낸다.

<38> 전자의 초기 속도 및 위치는 맥스웰 분포(Maxwellian distribution) 및 랜덤 분포(random distribution)에서 각각 추출되며, 각각의 의사 전자(pseudo electron)들의 궤도(trajectory)는 별도로 추적이 된다. 또한 입자 운동(particle motion)의 시간 단계(time step)는 다음과 같이 주어진다.

<39> 【수학식 5】

$$\Delta t_l = \min(0.01\tau_{rf}, 0.01\tau_{ECR}, t_{cl} - t_l)$$

<40> 여기서, t_l 은 입자 l 의 궤도가 갱신(update)되기 까지의 시간을 나타내고, τ_{rf} 는 고주파 주기(radio frequency period)이고, τ_{ECR} 은 국부 전자 사이클로트론 주기(local electron cyclotron period)이며, t_{cl} 은 다음 충돌때 까지의 시간, 즉 $t_{cl} = t_{l0} + v_m^{-1} \ln(R)$, $R \in [0, 1]$ (여기서, t_{l0} 는 초기 시간을 나타냄)을 각각 나타내며, 여러가지 가능한 프로세스(process)중에서 특정한 프로세스를 선택하는 것 역시 난수(random number)를 이용하게 된다.

<41> 이러한 몬테카를로 반복기(iterator)는 약 20~50 RF 사이클 동안(약 $3\mu s$) 계속되게 되며, 시간-평균 전자 에너지 분포함수(time-averaged electron energy distribution function) $f(\epsilon, r, z)$ 및 다음의 관계식으로부터 전자 충돌 소스 함수(electron impact source function)를 구하게 된다.

<42> 【수학식 6】

$$S_{ij} = n_e(r, z) \delta_{ij} N_{ij}(r, z) \times \int_0^\infty f(\epsilon, r, z) \left(\frac{2\epsilon}{m_e} \right) \sigma_{ij}(\epsilon) d\epsilon$$

<43> 여기서, $n_e(r, z)$ 와 $N_{ij}(r, z)$ 는 각각 전자 밀도와, 바로 직전 반복시 전달현상 해석 모듈에서 계산된 i-에너지, j-프로세스에서의 충돌 파트너 밀도(collision partner density)를 나타내고, ϵ 는 에너지를 나타낸다. 또한 δ_{ij} 는 프로세스 ij가 j 종들의 소스일 경우 +1, 로스(loss)가 될 경우는 -1이 된다.

<44> 전달 현상 해석 모듈에서는 모든 이온 및 중성종들에 대해 다음 수학식 7의 연속 방정식(continuity equation) 및 수학식 8의 포와송의 방정식(Poisson's equation)을 풀게 된다.

<45> 【수학식 7】

$$\frac{\delta N_j}{\delta t} = \nabla (\mu_j q_j N_j \vec{E}_s - D_j \nabla N_j) + \left(\frac{\delta N_j}{\delta t} \right)_c$$

<46> 【수학식 8】

$$\nabla \cdot \vec{E}_s = -\nabla^2 \Phi = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

<47> 수학식 7 및 수학식 8에서, μ_j 는 j종들의 이동도, D_j 는 j종들의 확산 계수, q_j 는 j종들의 전하, ρ 는 전하 밀도, $(\delta N_j / \delta t)_c$ 는 모든 충돌에 의한 밀도의 변화량, E_s 는 전기장, Φ 는 정전 포텐셜(electrostatic potential), ϵ_0 는 진공 상태의 유전율을 각각 나타낸다. $(\delta N_j / \delta t)_c$ 는 무거운 입자(heavy particle)에 의한 기여뿐만 아니라, $S_j(r, z)$ (좌표 (r, z) 위치에서의 생성속도)로부터의 기여도 포함되어 있으며, 상기 수학식 7 및 수학식 8에서 이들은 구별되지 않는다.

<48> 상기 연속 방정식에서 문제가 되는 것은 시뮬레이션 대상이 되는 많은 시스템의 압

력이 매우 낮아(100mTorr 이하) 누센 수(Knudsen number, 즉 λ/L , 여기서 λ 는 평균 자유 행로, L 은 반응기의 길이)가 커지게 되면(0.1이상), 드리프트-확산(drift-diffusion)시 확산 속도가 각 종들의 열적 속도(v_{th})보다 커지는 이상 현상이 벌어질 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위하여 각각 다음 수학적 식 9와 10에서와 같이 확산 계수와 입자 이동도에 제한을 주게 된다.

<49> 【수학적 식 9】

$$D_j = \min(v_{th}L, D_j)$$

<50> 【수학적 식 10】

$$\mu_j = \frac{eD_j}{kT_j}$$

<51> 여기서, e 는 전자의 전하량, k 는 볼츠만 상수, T_j 는 j 종의 온도를 나타낸다.

<52> 두번째 문제는, 보통의 플라즈마 동역학 시뮬레이션(plasma dynamics simulation)의 경우, 포와송의 방정식과 전하 연속 방정식을 따로 풀게 되지만, 이들을 동시에 푸는 경우에 생기는 시간-단계(time-step)의 문제인데, 전달 방정식(transport equation)을 익스플리시트 미분(explicit differencing)으로 구하는 경우, 시간-단계는 전적으로 다음의 크랜트 한계(Courant limit)에 의하여 제한을 받게 된다.

<53> 【수학적 식 11】

$$\Delta t_c \leq \min\left(\frac{\Delta r}{\mu_j E_r}, \frac{\Delta z}{\mu_j E_z}\right)$$

<54> 여기서, $\Delta r, \Delta z$ 는 공간 메쉬 크기(spacial mesh size)를 나타내고, E_r 는 r 방향으로의 전기장을 나타내며, E_z 는 z 방향으로의 전기장을 나타낸다. 단, 임플리시트해

(implicit solution)를 구하는 경우의 시간 단계는 크랜트 한계보다 이론상으로 훨씬 클 수도 있는데, 문제는 포와송의 방정식은 전달 방정식에 관계없이 익스플리시트 방법으로 풀어야 한다. 이는 다음의 수학식 12에서도 볼 수 있듯이 다음 단계의 포텐셜을 갱신하기 위해서는 현 단계의 전하 밀도를 알아야만 하기 때문이다.

<55> 【수학식 12】

$$\nabla^2 \Phi(t + \Delta t) = -\frac{\rho(t)}{\epsilon_0}$$

<56> 이러한 경우, 전기장이 시간-단계내에서 부호(sign)를 바꾸지 않기 위해서는 최대 시간 단계가 다음 수학식 13의 유전 완화 시간(dielectric relaxation time)보다는 작아야 한다는 조건이 성립한다.

<57> 【수학식 13】

$$\Delta t_d = \frac{\epsilon_0}{\sigma}$$

<58> 여기서, σ 는 플라즈마 전도도를 나타낸다. 약간의 계산을 통해 유전 완화 시간의 값을 추정해 보면, 낮은 압력, 높은 밀도의 플라즈마의 경우 σ 가 약 $0.1 \sim 1 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 정도의 값을 가지게 되므로 Δt_d 는 약 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 초 정도로서 크랜트 한계보다 상당히 작은 것을 알 수 있다.

<59> 이러한 시간-단계가 작아야만 하는 문제를 해결하기 위하여 전달 현상 해석 모듈에서는 다음과 같은 세미-임플리시트 미분(semi-implicit differencing) 형식의 기법을 고안하였다.

<60> 【수학식 14】

$$\nabla^2 \Phi(t + \Delta t) = -\frac{1}{\epsilon_0} \left[\rho(t) + \Delta t \frac{d\rho(t)}{dt} \right]$$

<61> 여기서, 전하 밀도의 시간-도함수는 전달 항(transport term)만을 포함하게 된다.

수학식 7의 전달 항을 대입하여 최종적으로 풀 식을 알아보면 다음과 같다.

<62> 【수학식 15】

$$\nabla^2 \Phi(t+\Delta t) + \frac{1}{\epsilon_0} \Delta t \sum_i e q_i \mu_i \times [\nabla N_i \nabla \Phi(t+\Delta t) + N_i \nabla^2 \Phi(t+\Delta t)] = -\frac{\rho(t)}{\epsilon_0} - \frac{1}{\epsilon_0} \Delta t e \sum_i q_i (\nabla D_i \cdot \nabla \Phi(t+\Delta t))$$

<63> 결과적으로 위의 수학식 15를 SOR(successive of relaxation) 방법으로 풀게되며, 최적화된 SOR 파라미터는 $1.8 \leq \alpha \leq 1.9$ 인 것으로 나타난다. 위의 세미-임플리시트 기법에 의하면 시간-단계를 보통 Δt_d 값보다 약 100~1000 배 혹은 크랜트 한계 정도의 크기까지 크게 할 수 있다.

<64> 쿠쉬너(Kushner) 교수 그룹에서 문헌에 보고한 바에 의하면, 위의 방법으로 시간-단계를 크게 하였을 경우에 정확도 차이가 대부분 몇 % 이내라고 되어 있지만, 직접 확인해본 결과 플라즈마 포텐셜과 플라즈마 밀도가 절대값에서 크게는 약 30% 까지 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 모든 경향은 정확히 일치하는 것으로 나타나 큰 문제가 없는 것으로 보여진다. 왜냐하면 이러한 류의 시뮬레이터의 목적은 절대값을 예측하는데 있는 것이 아니라 정확한 경향의 예측에 있기 때문이다.

<65> 포와송의 방정식을 푸는데 있어서, 경계 조건은 반응기 또는 기판 표면이 금속성이냐 혹은 유전체냐에 따라서 달라져야 하는데, 우선 표면이 금속성일 경우의 포텐셜은 표면이 접지되어 있다고 생각하거나 또는 외부에서 주어지는 포텐셜로 결정이 될 것이고, 표면이 유전체일 경우 플라즈마와 접촉하는 부분의 포텐셜 ϕ_0 는 다음과 같이 주어진다.

<66> 【수학식 16】

$$\Phi_0 = \frac{[\Phi_l + \Delta z [\sigma_s / \epsilon_0 + \epsilon_d \Phi_b / (\epsilon_0 L)]]}{1 + \Delta z \epsilon_d / (\epsilon_0 L)}$$

<67> 여기서, ϕ_l 은 표면위의 첫번째 메쉬(mesh)에서의 플라즈마 포텐셜을 나타내고, ϵ_d 는 유전체의 유전율(permittivity), L 은 유전체의 두께, ϕ_b 는 표면 반대편의 플라즈마 포텐셜, 그리고 σ_s 는 표면 전하 밀도를 가리키며 이는 다음과 같은 식에 의하여 구하여 진다.

<68> 【수학식 17】

$$\sigma_s = \sum_j \int e q_j \phi_j dt$$

<69>

수학식 17에서 $\phi_j = (q_j \mu_j N_j \vec{E}_j - D_j \nabla N_j) \cdot \vec{n}$ 은 표면에 도달하는 플럭스를 의미한다.

전달 현상 해석의 수렴 속도는 종 밀도(species density)에 대한 초기 추정치(initial guess)가 얼마나 실제값에 근접하는가에 결정적으로 의존하게 된다. 보통 수렴되기 위한 시간은 실제시간으로 약 10~100 μs 정도가 걸리게 되므로 낮은 초기 추정치일 경우, 상당한 시간이 소요된다. 예를 들어서 시간-단계가 1 ns ($10^{-9}s$)일 경우 100 μs 까지 가기 위해서는 10^5 사이클이 필요하게 되며, Silicon Graphics Onyx(Silicon Graphics사의 Onyx라는 컴퓨터 모델을 말함)에서 1 사이클당 0.025초 정도가 소요되므로 전달 현상만을 푸는데 약 7 시간 정도가 소요될 것이다.

<70> 이러한 시간을 줄이기 위하여 가속 기법(acceleration technique)을 쓰게 되는데, 이는 전달 현상 해석이 시작되기 전에 이전의 결과를 이용하여 초기 추정치를 개선해 주는 방법이다. 즉, 맨 처음에 주어진 시간-단계(약 1~100ns)로 계산된 (dN_j/dt) 를 약 1000~2000배 스케일링 업(scaling up) 또는 스케일링 다운(scaling down)함으로써 유효 시

간-단계(effective time-step)를 1000~2000배 증가시키는 방법으로 다음의 식으로 표현할 수 있다.

<71> 【수학식 18】

$$N_j(r,z,t+\Delta t) = N_j(r,z,t) + \gamma \left(\frac{dN_j}{dt} \right) \Delta t$$

<72> 즉, 가속을 결정하는 파라미터인 γ 를 약 1000~2000으로 함으로써 유효 시간-단계를 증가시키는 방법으로, 이렇게 할 경우 대략 100~1000 사이클에 대부분 수렴하는 결과를 얻을 수가 있게 된다(보통 입력(input)에서 최대 사이클은 500 정도로 주고 있음). 이때 문제가 될 수 있는 전하 중성(charge neutrality)의 문제는 음으로 대전된 종들의 밀도를 양으로 대전된 종들의 합과 같아지도록 재정규화(renormalize)함으로써 해결할 수 있다.

<73> 이와 같은 몬테카를로(Monte Carlo)법에 의한 전자 밀도 및 온도의 계산과, 이온 및 중성종의 전달 현상 해석은 특징적인 자기장 방향에서의 단면 자기장 분포에 대한 축을 포함한 복수개의 2차원 단면에 대하여 수행하고, 각 단면에 대한 수렴값을 얻어 이를 평균하여 플라즈마 특성을 얻는다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 플라즈마 반응기(100) 내에서의 전자의 밀도 및 온도, 표면 반응에 참여하는 이온과 중성종의 분포, 웨이퍼 표면으로 유입되는 플럭스 등 공정에 영향을 미치는 플라즈마 특성이 얻어진다.

<74> 도 5는 영구자석에 의해 형성된 웨이퍼 위에서의 정자기장 분포를 도시한 도면이다.

<75> 도 5를 참조하면, 비대칭적으로 배열되어 있고 플라즈마 반응기(100) 주위를 회전하고 있는 영구자석(102)들에 의하여 플라즈마 반응기(100) 내의 웨이퍼(W) 상에 자기장

이 형성된다. 이 자기장은 정자기장으로서, 웨이퍼 상의 위치마다 자속 밀도가 다르게 나타난다. 예를 들면, 웨이퍼(W) 상에서 A 지점의 자속 밀도는 180 Gauss 정도이고, B 지점의 자속 밀도는 120 Gauss 정도이며, C 지점의 자속 밀도는 60 Gauss 정도로 나타난다. 이러한 자기장 분포에 대하여 특징적인 자기장 방향, 예컨대 I, II, III 방향에서의 단면 자기장 분포에 대한 2차원 플라즈마 시뮬레이션을 수행하여, 최종적으로 전체적인 플라즈마 특성을 얻을 수 있다.

<76> <실험예 1>

<77> 도 6은 3개면과 8개면의 단면 자기장 분포에 대한 2차원 플라즈마 시뮬레이션을 이용하여 얻은 실리콘 산화막(SiO_2)의 식각 속도 분포를 도시한 그래프이다. 여기서, 압력은 25mTorr, RF 파워는 1200W, CHF_3 의 유량은 150sccm, CO의 유량은 50sccm, O_2 의 유량은 10sccm으로 하여 시뮬레이션 하였다. 웨이퍼상의 위치는 웨이퍼 중심부터 웨이퍼 가장자리로의 거리를 말한다.

<78> 도 6에 도시된 바와 같이, 웨이퍼 중심에서의 실리콘 산화막의 식각 속도는 3개면에 대해 시뮬레이션한 값과 8개면에 대해 시뮬레이션한 값이 모두 약 1600 Å/min 정도로 나타났고, 웨이퍼 중심에서 6cm 정도 떨어진 지점에서의 실리콘 산화막의 식각 속도는 3개면에 대해 시뮬레이션한 값은 약 1800 Å/min 정도이고, 8개면에 대해 시뮬레이션한 값은 약 1750 Å/min 정도로 나타났다. 이상에서 살펴본 바와 같이, 3개면의 시뮬레이션 결과와 8개면의 시뮬레이션 결과를 이용하여 식각 속도 분포를 계산한 결과가 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

<79> <실험예 2>

<80> 도 7은 파워 변화에 대하여 실제로 측정한 플라즈마 밀도와, 3개면에 대하여 2차원 플라즈마 시뮬레이션을 수행하여 얻은 플라즈마 밀도를 도시한 그래프이다. 여기서, 아르곤(Ar) 플라즈마를 사용하였고, Ar의 유량은 200sccm, 압력은 40mTorr로 하였다.

<81> 도 7에 도시된 바와 같이, 파워 변화에 따른 아르곤 플라즈마의 측정치와 시뮬레이션 계산치가 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

<82> <실험예 3>

<83> 아래의 표는 공정 조건 변화에 따른 실리콘 산화막(SiO₂)과 실리콘 질화막(Si₃N₄)막의 식각 속도에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 얻은 계산치와 실제 공정에 적용하여 얻은 실험치를 나타낸 도표이다. 공정 조건 변화에 대한 베어 웨이퍼(bare wafer)에서 식각 속도 변화를 알아 보기 위하여 압력 35mTorr에서 식각가스 조성비와 파워를 변화시키면서 SiO₂막과 Si₃N₄막에 대하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

<84> 【표 1】

공정조건 (파워/CHF ₃ (sccm)/CO(sccm)/O ₂ (sccm))	식각 속도(Å/min)					
	SiO ₂			Si ₃ N ₄		
	계산치(Å)	실험치(Å)	오차(%)	계산치(Å)	실험치(Å)	오차(%)
1500W/ 31/ 150/ 10	2117	2019	4.87	1850	1838	0.78
1500W/ 35/ 150/ 6	2454	2560	-4.18	2133	2036	4.72
1500W/ 39/ 150/ 2	2755	2737	0.65	2362	2262	4.39
1200W/ 35/ 150/ 6	2156	2294	-6.02	1846	1924	-4.04
1800W/ 35/ 150/ 6	2665	2726	-2.23	2314	2191	5.60

<85> 상기 표는 CHF₃가 증가함에 따라 전체 플럭스와 래디칼 플럭스가 증가하여 식각 속도가 증가하는 경향이 나타나며, 파워가 증가함에 따라 식각 속도도 역시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한 위의 표에서 알 수 있듯이, 실리콘 산화막과 실리콘 질화막의 식각 속도에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 얻은 계산치와 실제 공정에 적용하여 얻은

실험치가 6% 범위의 오차 범위에서 거의 일치함을 알 수 있다.

<86> 도 8a 및 도 8b는 식각가스 조성비 변화에 따른 실리콘 산화막 및 실리콘 질화막의 식각 속도 분포를 도시한 그래프이다. 도 8a는 실리콘 산화막에 대한 속도 분포를 나타낸 것이고, 도 8b는 실리콘 질화막에 대한 속도 분포를 나타낸 것이다. 여기서, 'Sim'은 시뮬레이션을 수행하여 얻은 계산치를 나타내며, 'Exp'는 실제 공정에 적용하여 얻은 실험치를 나타낸 것이다. 가스 조성비에 대하여 나타낸 항, 예컨대 31/150/10은 순서적으로 CHF₃의 유량(sccm)/CO의 유량(sccm)/O₂의 유량(sccm)을 각각 나타낸다. 웨이퍼상의 위치는 웨이퍼 중심부터 웨이퍼 가장자리로의 거리를 말한다.

<87> 도 8a 및 도 8b를 참조하면, 실리콘 산화막의 경우, 웨이퍼 가장자리에서 시뮬레이션을 수행하여 얻은 계산치가 실제 공정에 적용하여 얻은 실험치에 비하여 작게 나타나고 있으나, 웨이퍼 위치별로 식각 속도가 6% 이내의 오차로 예측되고 있음을 보여준다. 실리콘 질화막의 경우, 웨이퍼 가장자리 방향으로 식각 속도가 증가하다가 소정 위치에서 최대값을 가진 후, 가장자리에서 감소하는 경향까지 정확하게 예측되고 있음을 알 수 있다. 실리콘 질화막에 대하여도 역시 웨이퍼 위치별로 식각 속도가 6% 이내의 오차로 예측되고 있다.

<88> 이상, 본 발명의 바람직한 실시예를 들어 상세하게 설명하였으나, 본 발명은 상기 실시예에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상내에서 당 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의하여 많은 변형이 가능함은 명백하다.

【발명의 효과】

<89> 본 발명에 의한 플라즈마 장치의 시뮬레이션 방법에 의하면, 자기장에 대하여는 플

라즈마와 독립적으로 3차원적으로 해석하고, 플라즈마에 대하여는 특징적인 자기장에서
의 축을 포함하는 2개면 이상의 2차원 단면에 대한 계산을 수행하여 시뮬레이션 함으로
써, 시뮬레이션에 소요되는 계산 시간을 대폭으로 줄일 수 있고, 또한 플라즈마 특성에
대한 비교적 정확한 해석이 가능하다. 즉, 복잡한 자석 구조를 가진 DRM 장비에 대한 플
라즈마 해석이 단시간, 예컨대 1~2 시간 정도 이내에 가능하고, 또한 플라즈마 밀도 및
온도, 각 화학종들의 밀도 분포, 웨이퍼 표면으로 유입되는 플럭스 분포 등의 플라즈마
특성을 비교적 정확하고 쉽게 예측할 수 있다. 또한, 본 발명의 플라즈마 시뮬레이션 방
법을 통하여 얻은 플라즈마 특성을 바탕으로 식각 및 증착 속도의 예측과 형상 재현 시
뮬레이션도 수행할 수 있으므로 공정 개발 및 공정 최적화 등에 효율적으로 활용할 수
있다.

【특허청구범위】**【청구항 1】**

플라즈마 반응기와, 상기 플라즈마 반응기 주위를 일정 속도로 회전하고 있는 비대칭구조로 배열된 복수개의 영구자석이 구비되어 있는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정을 시뮬레이션하는 방법에 있어서,

(a) 상기 플라즈마 반응기 형태 및 공정 조건을 입력하고, 플라즈마 충돌 반응 데이터를 입력하는 단계;

(b) 상기 영구자석에 의해 유도된 정자기장을 3차원적으로 해석하는 단계;

(c) 상기 데이터들을 이용하여 몬테카를로법에 의하여 전자 밀도 및 온도를 계산하고, 이온 및 중성종의 전달 현상을 해석하여 수렴할 때까지 반복하여 계산하는 단계; 및

(d) 상기 수렴된 값을 이용하여 전체적인 플라즈마 특성을 얻는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법.

【청구항 2】

제1항에 있어서, 상기 (c) 단계의 플라즈마 해석은 특징적인 자기장 방향에서의 단면 자기장 분포에 대한 2차원 단면에 대하여 플라즈마 시뮬레이션을 수행하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법.

【청구항 3】

제2항에 있어서, 상기 2차원 플라즈마 시뮬레이션은 축을 포함한 복수개의 2차원 단면에 대하여 계산하여, 각 단면에 대한 수렴값을 얻고, 이를 평균하여 플라즈마 특성

을 얻는 것을 특징으로 하는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법.

【청구항 4】

제1항에 있어서, 상기 플라즈마 장치는 DRM 플라즈마 장치인 것을 특징으로 하는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법.

【청구항 5】

플라즈마 반응기와, 상기 플라즈마 반응기 주위를 일정 속도로 회전하고 있는 비대칭구조로 배열된 복수개의 영구자석이 구비되어 있는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정을 시뮬레이션하는 방법을 기록한, 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체에 있어서,

(a) 상기 플라즈마 반응기 형태 및 공정 조건 데이터를 입력하는 프로그램 모듈;

(b) 플라즈마 충돌 반응 데이터를 입력하는 프로그램 모듈;

(c) 상기 영구자석에 의해 유도된 정자기장을 3차원적으로 푸는 프로그램 모듈;

및

(d) 상기 데이터들을 이용하여 몬테카를로법에 의하여 전자 밀도 및 온도를 계산하고, 이온 및 중성종의 전달 현상을 해석하여 수렴할 때까지 반복하여 계산하는 프로그램 모듈을 포함하는 것을 특징으로 하는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

【청구항 6】

제5항에 있어서, 상기 (d)의 프로그램 모듈은 특징적인 자기장 방향에서의 단면 자기장 분포에 대한 2차원 단면에 대하여 플라즈마 시뮬레이션을 수행하여 이루어지는 것

을 특징으로 하는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

【청구항 7】

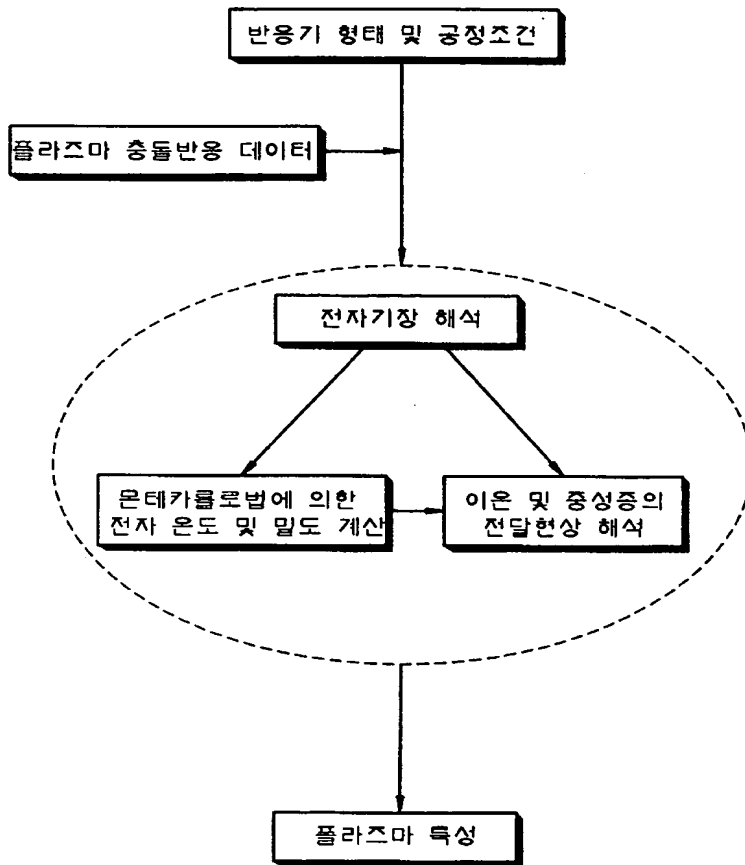
제6항에 있어서, 상기 2차원 플라즈마 시뮬레이션은 축을 포함한 복수개의 2차원 단면에 대하여 계산하여, 각 단면에 대한 수렴값을 얻고, 이를 평균하여 플라즈마 특성을 얻는 것을 특징으로 하는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

【청구항 8】

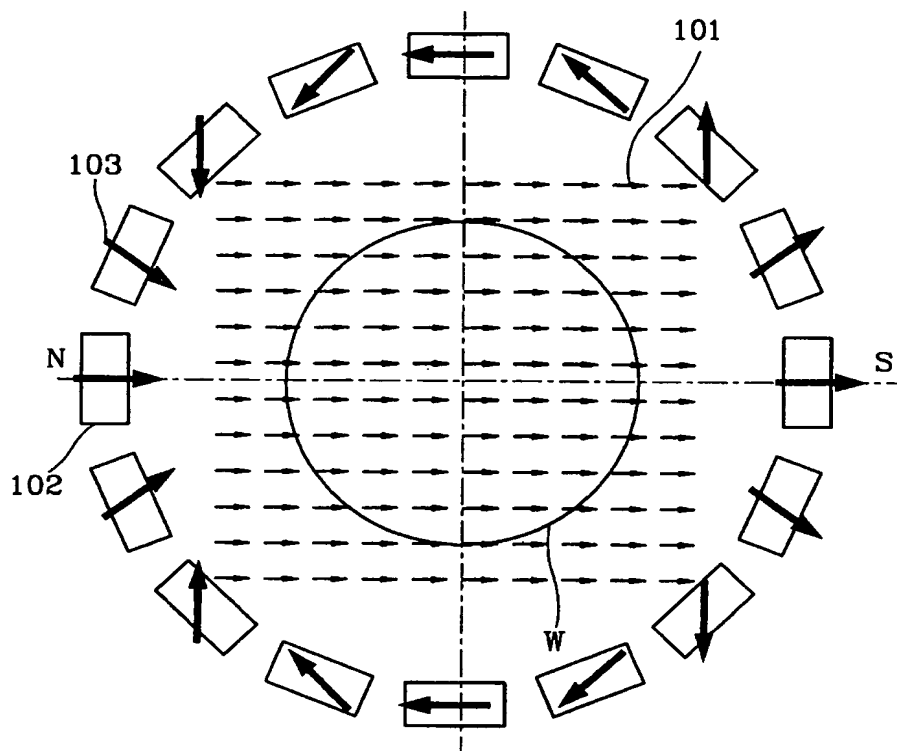
제5항에 있어서, 상기 플라즈마 장치는 DRM 플라즈마 장치인 것을 특징으로 하는 플라즈마 장치에 의한 플라즈마 처리 공정의 시뮬레이션 방법을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

【도면】

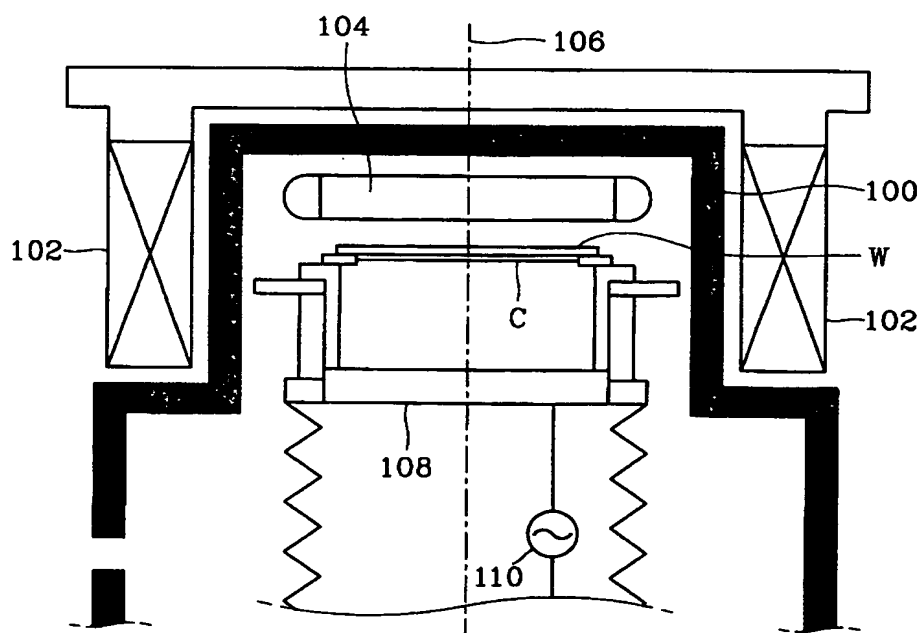
【도 1】



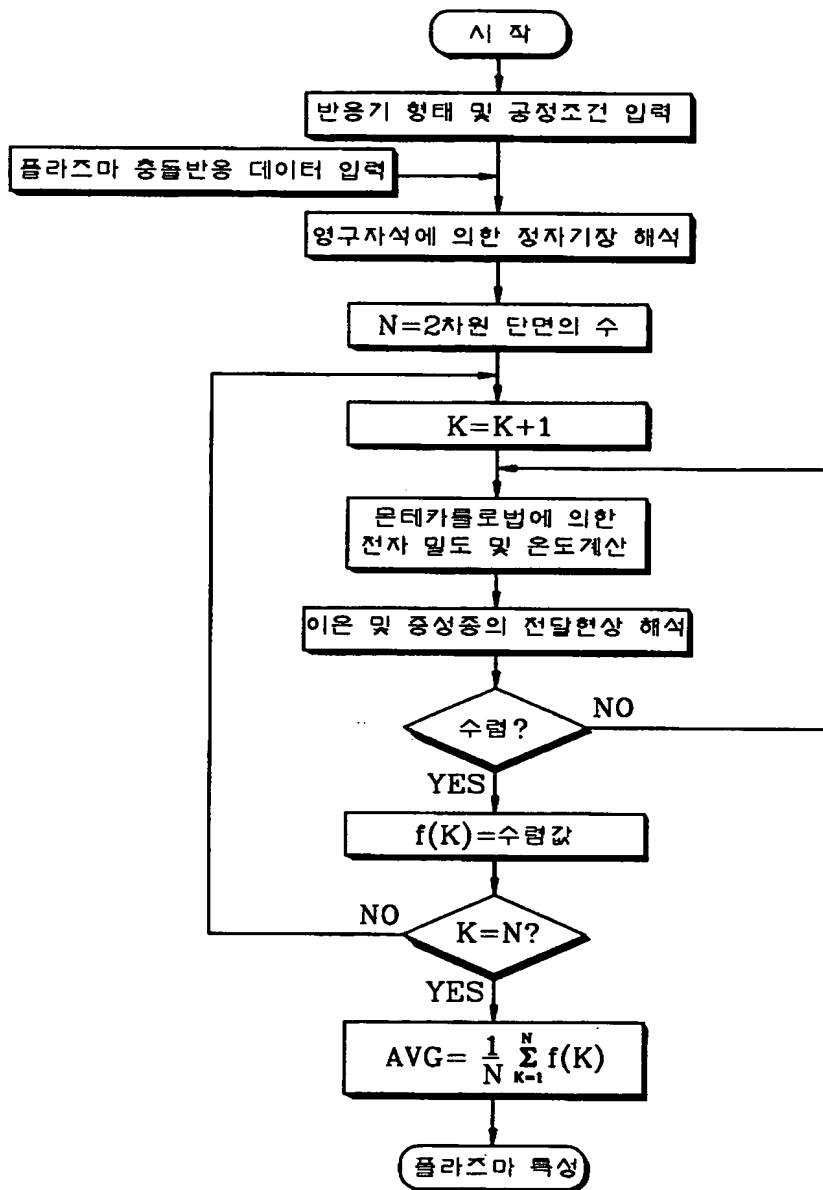
【도 2】



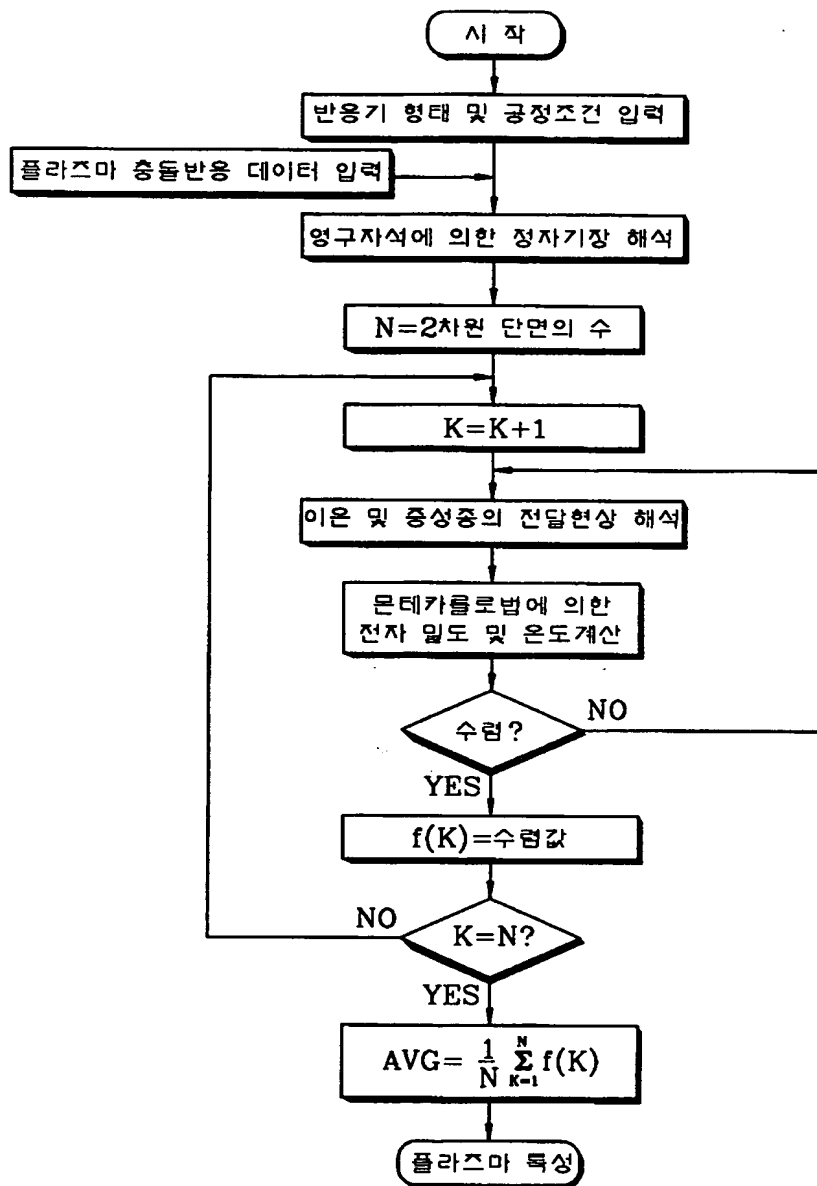
【도 3】



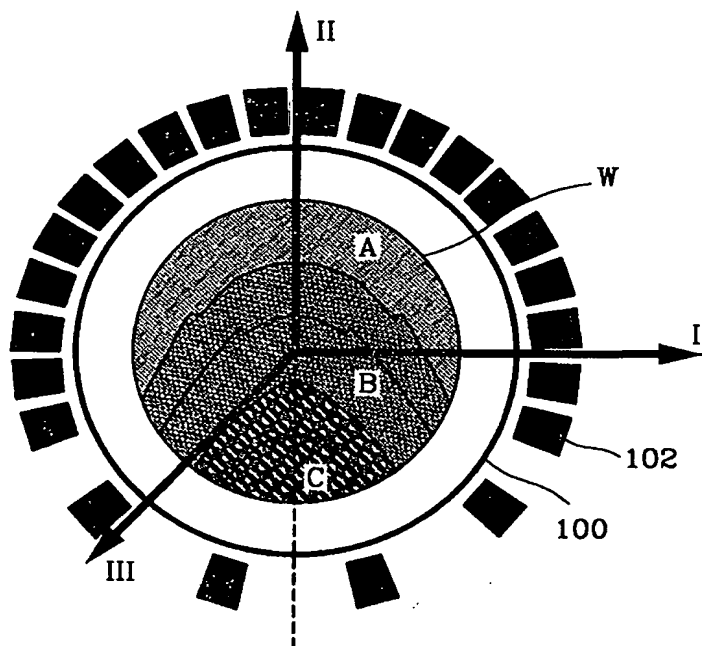
【도 4a】



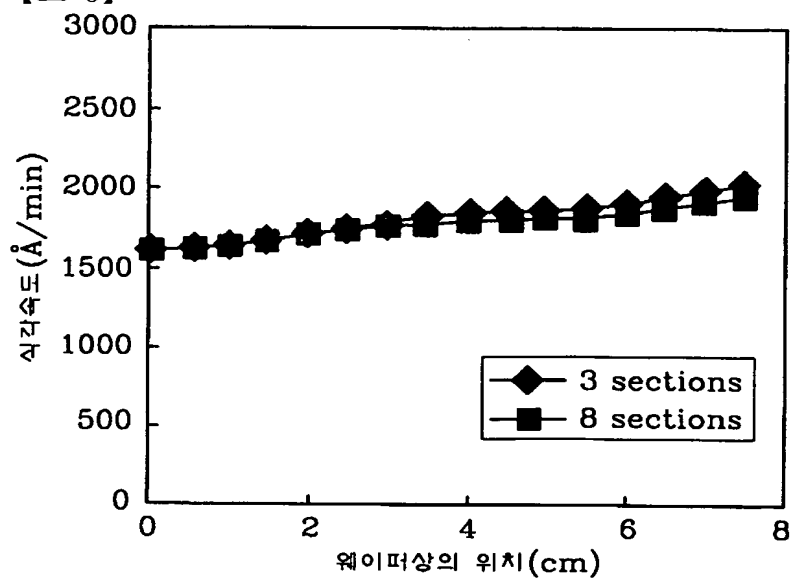
【도 4b】



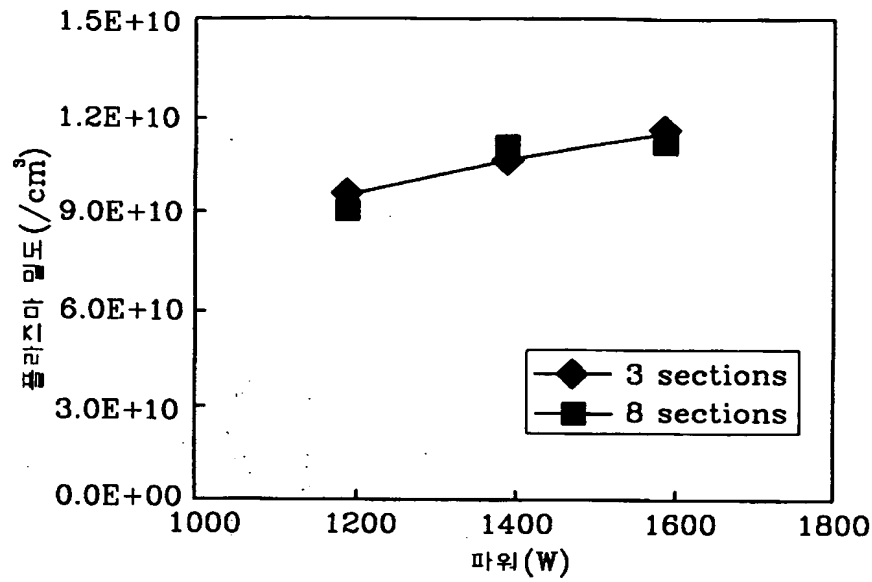
【도 5】



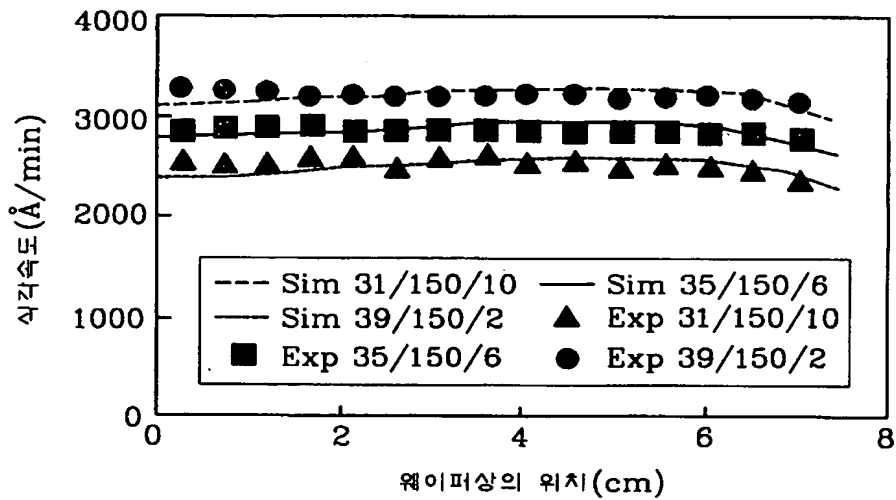
【도 6】



【도 7】



【도 8a】



【도 8b】

